

УДК 678.747.2

Ю.А. Гусев¹, О.Н. Твердая¹, А.А. Громова¹**УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТВЕРЖДЕНИЯ И УГЛЕРОДНОЙ РАВНОПРОЧНОЙ ТКАНИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-6-6

Приведены результаты работ, выполненных во ФГУП «ВИАМ», по разработке полимерного композиционного материала нового поколения на основе расплавленного эпоксидного связующего с низкой температурой отверждения и равнопрочной углеродной ткани отечественного производства. Представлены характеристики углеродной ткани и сравнительные упруго-прочностные характеристики полученного углепластика. Полученные результаты показывают, что разработанный углепластик не уступает по упруго-прочностным свойствам импортным и отечественным аналогам.

Ключевые слова: композиционный материал, углепластик, препрег, углеродная ткань, связующее.

This article presents development, carried out by FSUE «VIAM», of new generation of polymer composite material based on melted low temperature epoxy resin and domestic developed carbon fabric. Comparative elastic and strength characteristics of the cured composite and carbon fabric characteristics are submitted. The received results show that the developed composite doesn't concede on is elastic to strength properties of the import and domestic analogs.

Keywords: composite material, carbon fiber reinforced plastic, prepreg, carbon fabric, resin.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях планера гражданских самолетов является неотъемлемой частью современного самолетостроения, предъявляющего повышенные требования к прочностным и жесткостным характеристикам материала, а также стойкости к усталостным напряжениям. Можно констатировать, что ПКМ в определенной степени постепенно заменяют металлы в конструкции планера. Это связано с тем, что их применение обеспечивает снижение массы конструкции на 20–25% при сохранении требуемых упруго-прочностных характеристик. Объем применения ПКМ в современной авиационной технике постоянно возрастает, и в настоящее время детали и конструкции из ПКМ составляют до 50% от массы современных авиационных планеров, таких как Boeing-787 и Airbus A350 [1, 2].

На протяжении последних 20 лет наиболее широкое применение ПКМ находят в конструкциях механизации крыла и оперения гражданских самолетов. Однако доля отечественных материалов в данных конструкциях очень мала [3, 4].

В настоящее время в конструкции элементов механизации крыла самолета MC-21 предусмотрено применение углепластиков фирмы Cytec (США) на основе полимерной матрицы Сусом 970 с температурой отверждения 177°C. Материалы поставляются в Россию с заводов, расположенных в США и странах Евросоюза. Применение импортных ПКМ связано со следующими экономическими и технологическими рисками:

– указанные материалы подпадают под экспортный контроль со стороны властей США, и их поставка может быть приостановлена или прекращена в связи с изменением экономической или геополитической обстановки в мире;

– полуфабрикаты ПКМ имеют ограниченный срок хранения при 20°C (от 10 до 30 сут). В связи с этим транспортировка материалов осуществляется специальным транспортом в замороженном состоянии, что приводит к увеличению стоимости материалов и повышает риски, связанные с длительной транспортировкой, хранением, таможенным оформлением.

Применение российских материалов в конструкции самолета МС-21 позволит снизить технологическую и экономическую зависимость от стран Евросоюза и США и обеспечить создание новых высокотехнологичных рабочих мест.

В Российской Федерации в настоящее время для изготовления деталей и узлов самолетов нашли применение ПКМ на основе эпоксидных связующих марок ЭДТ-10 (композиция разработана в ВИАМ в 1965 г.), 5-211БН (ВИАМ – в 1975 г.), ЭДТ-69Н (ВИАМ – в 1986 г.), которые формуются по ступенчатому режиму и имеют достаточно высокую конечную температуру отверждения (180°C) и невысокую рабочую температуру – до 80°C. Данные связующие растворного типа содержат в своем составе спирто-ацетоновую смесь в качестве растворителя. При их переработке в ПКМ выделяется до 40% летучих веществ, что приводит к образованию сильной пористости в изделиях и, соответственно, падению упруго-прочностных свойств [5, 6].

Во ФГУП «ВИАМ» разработано эпоксидное связующее марки ВСЭ-34 с энергоэффективным режимом отверждения – последняя ступень отверждения при температурах не более 140°C. Связующее ВСЭ-34 обеспечивает повышенную технологичность и формирует в процессе отверждения прочную полимерную матрицу с максимальной реализацией в ПКМ прочности армирующих волокон при рабочих температурах не выше 100°C [7].

Данное современное связующее расплавного типа – при изготовлении полуфабрикатов (препрегов) на его основе не используются растворители с содержанием спирто-ацетоновой смеси. Расплавная технология позволяет получать ПКМ с низкой пористостью, так как при их формовании не выделяются в значительном количестве летучие вещества, что позволяет изготавливать изделия с более высокими упруго-прочностными свойствами.

Применение расплавных связующих с энергоэффективными режимами отверждения позволяет обеспечить снижение стоимости изготовления конструкций до 25% за счет упрощения технологии переработки препрегов, снижения трудоемкости, энергозатрат, затрат на вспомогательные материалы, оборудование, оснастку, увеличения производительности, улучшения условий труда и экологической безопасности [8, 9].

Во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд материалов на основе отечественных связующих расплавного типа и импортных углеродных наполнителей [10]. В 2015 г. завершились работы по проведению паспортизации ПКМ марки ВКУ-45/3692 на основе связующего ВСЭ-34 и равнопрочной углеродной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692). Данный материал рекомендован для применения в конструкциях механизации крыла и оперения гражданских самолетов и удовлетворял всем требованиям к данному типу изделий, но был разработан на основе импортного наполнителя. На момент его разработки отсутствовал наполнитель отечественного производства, при использовании которого достигались бы необходимые упруго-прочностные характеристики. Имеющиеся отечественные равнопрочные ткани типа УТ-900 на основе жгутовых наполнителей типа УКН-П значительно уступают по уровню свойств импортной углеродной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692) [11, 12].

В РФ в настоящее время создано современное производство углеродного наполнителя в Республике Татарстан (г. Елабуга), по выпуску российских углеродных наполнителей с характеристиками, близкими к характеристикам углеродного наполнителя марки НТА-40(ЗК), на основе которого изготовлена импортная углеродная ткань фирмы Porcher Ind. (арт. 3692). Альтернативой данного жгутового наполнителя являются углеродные нити марки UMT40-ЗК. Во ФГУП «ВИАМ» разработана технологическая инструкция на изготовление углеродной ткани марки ВТкУ-5 на основе углеродных нитей марки UMT40-ЗК, которая является аналогом ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692). Кроме того, проведена работа по замещению импортного углеродного наполнителя в углепластике ВКУ-45/3692.

При проведении данной работы исследованы углеродные наполнители и основные упруго-прочностные характеристики углепластика ВКУ-45/UMT-ЗК.РТН на основе отечественного наполнителя ВТкУ-5 и расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-34, а также проведено их сравнение с отечественными и импортными аналогами по следующим свойствам: пределу прочности и модулю упругости при растяжении и сжатии, пределу прочности при межслойном сдвиге, пределу прочности и модулю упругости при сдвиге в плоскости листа. Основная цель работы – показать, что по основным свойствам разработанный материал не уступает импортному и отечественному аналогам.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», раздел 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Углепластик марки ВКУ-45/UMT-ЗК.РТН изготавливали методом автоклавного формования из препрега на основе эпоксидного связующего ВСЭ-34 и углеродной ткани ВТкУ-5, на основе углеродных нитей UMT40-ЗК (рис. 1) [13, 14].

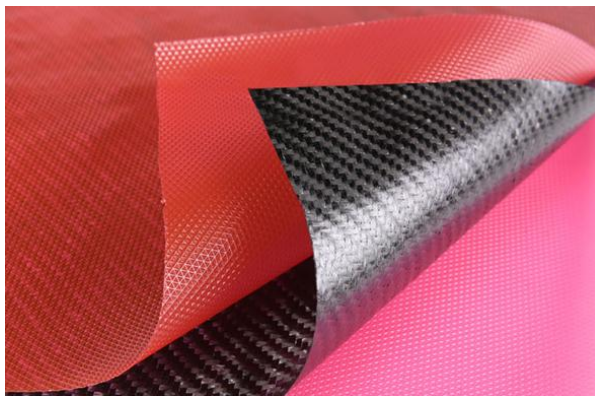


Рис. 1. Препрег углепластика ВКУ-45/UMT-ЗК.РТН

Препрег углепластика ВКУ-45/UMT-ЗК.РТН получали по расплавной технологии методом пропитки на специализированном участке изготовления препрегов во ФГУП «ВИАМ». Нарботку препрега осуществляли на пропиточной установке Coateama BL-2800.

Плиты углепластика ВКУ-45/UMT-ЗК.РТН изготовлены методом послойной выкладки препрега с последующим формованием в автоклаве фирмы Magnabosco с энергоэффективным режимом отверждения (последняя ступень отверждения при температурах – не более 140°C) [15].

Образцы для испытаний изготовлены из плит углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РПН на автоматизированном отрезном станке с водяным охлаждением. Исследованы также свойства ткани ВТкУ-5 и исходной углеродной нити УМТ40-3К.

При исследовании свойств углеродной нити и ткани применялись следующие методы: определение линейной плотности углеродного жгута – по ГОСТ 6611.1, определение линейных размеров и поверхностной плотности ткани – по ГОСТ 29104.1, определение количества нитей по основе и утку – по ГОСТ 29104.3.

При исследовании упруго-прочностных характеристик применяли следующие методы: определение предела прочности и модуля упругости при растяжении – по ASTM D3039, определение предела прочности и модуля упругости при сжатии – по ASTM D6641, определение предела прочности при межслойном сдвиге – по ASTM D2344, определение предела прочности и модуля упругости при сдвиге в плоскости листа – по ASTM D3518/D3518M.

Испытания образцов проводили на испытательной машине W+b LFM 250 (Швейцария), Zwick Roell Z-100 и Z-400 (Германия). Для взвешивания образцов использовали электронные весы с диапазоном измерения от 0 до 820 г с дискретностью отсчета 0,01 г (класс точности III по ГОСТ Р53-228); для определения линейных размеров – металлическую линейку по ГОСТ 427; для определения температуры и влажности – термогигрометр «ИВА-6Н» по ТУ 4311-011-18513042.

Результаты

При проведении работы исследованы характеристики ткани ВТкУ-5 на основе углеродных нитей УМТ40-3К в сравнении с зарубежными и отечественными аналогами.

Характеристики углеродных нитей УМТ40-3К в сравнении с зарубежным (НТА40(3К)) и отечественным (УКН-М-3К) аналогами приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики углеродных нитей УМТ40-3К
в сравнении с зарубежным и отечественным аналогами**

Углеродная нить	Номинальная линейная плотность, текс	Предел прочности при растяжении комплексной нити, МПа	Модуль упругости при растяжении комплексной нити, ГПа	Массовая доля аппрета, %	Плотность волокна, г/см ³
УМТ40-3К	190	4000	250	0,8–1,5	1,78
НТА40(3К)	200	3950	240	1,3	1,76
УКН-М-3К	190	3500	–	0,5–1,5	1,75

По показателям предела прочности и модуля упругости при растяжении комплексные нити марок УМТ40-3К и НТА40(3К) находятся на одном уровне. Поэтому можно сделать вывод, что упруго-прочностные характеристики ПКМ на основе данных нитей будут пропорциональны при одинаковых поверхностной плотности наполнителя, типе переплетения и содержании связующего в препреге и углепластике. Предел прочности при растяжении комплексной нити УКН-М-3К ниже, чем у нитей марок УМТ40-3К и НТА40(3К), соответственно прочность пластика при аналогичных условиях будет также ниже. По показателю линейной плотности нити марок УМТ40-3К и НТА40(3К) находятся на одном уровне, что позволяет изготовить на их основе ткани с одной и той же поверхностной плотностью при одинаковом типе переплетения.

В табл. 2 приведены характеристики ткани ВТкУ-5, изготовленной по разработанной во ФГУП «ВИАМ» технологии, в сравнении с зарубежным и отечественным аналогами. Отклонение поверхностной плотности, ширины ткани и количества нитей на сантиметр ткани от указанных значений по результатам исследований не превышает 1–2%, что свидетельствует о стабильности свойств углеродной ткани.

Таблица 2

Характеристики ткани ВТкУ-5 в сравнении с зарубежным и отечественным аналогами

Ткань	Ширина, мм	Переплетение	Плотность основа/уток, нить/см	Нити основы и утка	Основа/уток, %	Поверхностная плотность, г/м ²
ВТкУ-5	1000	Саржа (2×2)	5×5	UMT40-3K	50/50	200
Porcher (арт. 3692)	1000	Саржа (2×2)	5×5	HTA40(3K)	50/50	200
УТ-900-3	900	Полотно	6×6	3K	50/50	240

Таким образом, по основным параметрам ткань ВТкУ-5 является аналогом импортной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692). Ткань УТ-900-3 имеет более плотное переплетение и поверхностную плотность, меньшую ширину и получена на основе менее прочных нитей УКН-М-3К.

При проведении работ по исследованию свойств разработанного углепластика ВКУ-45/UMT-3K.PTH на основе отечественной равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-5 и связующего ВСЭ-34 определены его основные упруго-прочностные характеристики при температуре в помещении от 18 до 25°C и влажности воздуха не более 60%. Пределы прочности и модули упругости при растяжении и сжатии определяли в направлениях основы и утка с целью установить степень влияния типа переплетения углеродной ткани на прочность полученного углепластика. Данные представлены в виде диаграмм с указанием средних значений характеристик по результатам испытаний не менее десяти образцов углепластика.

На рис. 2 показаны результаты испытаний по определению предела прочности и модуля упругости при растяжении углепластика ВКУ-45/UMT-3K.PTH в сравнении с аналогами с приложением нагрузки в направлении основы и утка.

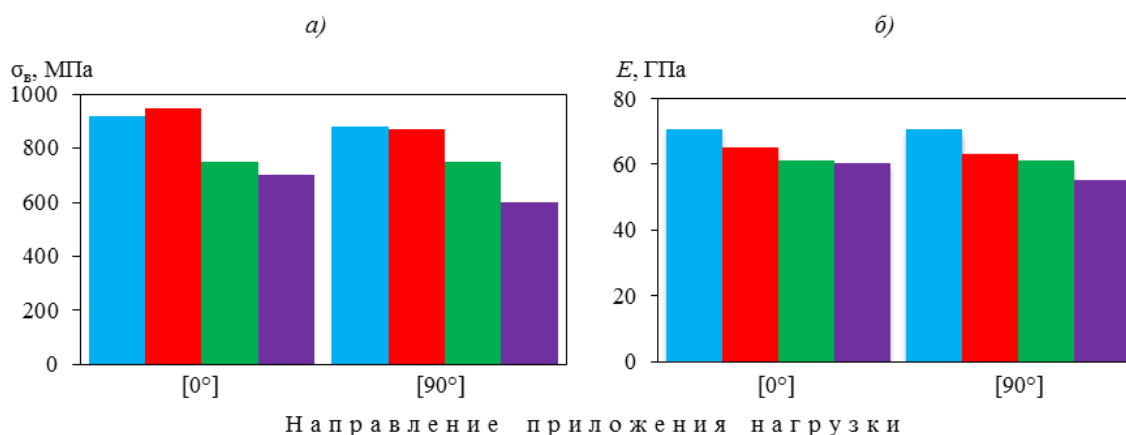


Рис. 2. Предел прочности (а) и модуль упругости (б) при растяжении углепластика ВКУ-45/UMT-3K.PTH (■) по сравнению с отечественными (ВКУ-45/3692 (■) и УТ-900-3 (■)) и зарубежным (Cytac (■)) аналогами

По показателю предела прочности при растяжении углепластики марок ВКУ-45/UMT-3K.PTH и ВКУ-45/3692 находятся на одном уровне, превышая данный показатель для аналога фирмы Cytac более чем на 10% и для углепластика на основе ткани УТ-900-3 – более чем на 20%.

Показатель модуля упругости при растяжении для углепластика ВКУ-45/UMT-3K.PTH превышает данные показатели для отечественного аналога марки ВКУ-45/3692 и зарубежного аналога фирмы Cytac на 5–8% и для углепластика на основе ткани УТ-900-3 – более чем на 10%.

При этом для углепластиков марок ВКУ-45/УМТ-3К.РТН и ВКУ-45/3692 в направлении $[90^\circ]$ данные свойства приблизительно на 5–10% ниже, чем в направлении $[0^\circ]$, а для углепластика на основе ткани УТ-900-3 – ниже более чем на 20%, что обусловлено особенностями изготовления углеродных тканей – полотняным переплетением ткани УТ-900-3 и саржевым переплетением ткани ВТкУ-5. Для углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН падение свойств в направлении уточной нити незначительно и может быть обусловлено не столько переплетением, сколько особенностями протяжки углеродной ткани при изготовлении полуфабриката (препрега).

На рис. 3 показаны результаты испытаний по определению предела прочности при сжатии углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН в сравнении с аналогами с приложением нагрузки в направлении основы и утка.

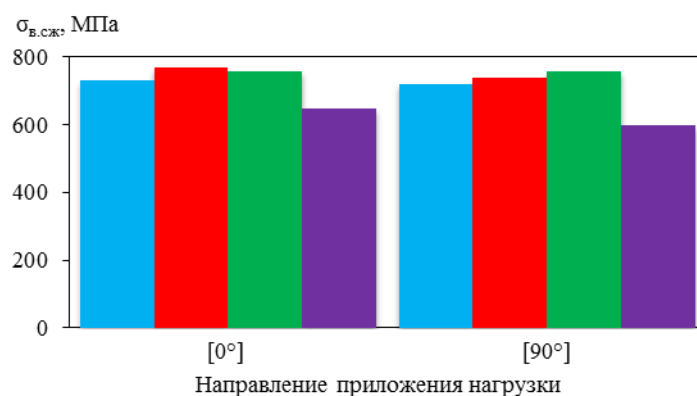


Рис. 3. Предел прочности при сжатии углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН (■) по сравнению с отечественными (ВКУ-45/3692 (■) и УТ-900-3 (■)) и зарубежным (Сytec (■)) аналогами

По показателю предела прочности при сжатии углепластики марок ВКУ-45/УМТ-3К.РТН и ВКУ-45/3692, а также аналог фирмы Cytec находятся на одном уровне, превышая данный показатель для углепластика на основе ткани УТ-900-3 более чем на 20%. От направления приложения нагрузки данный показатель практически не зависит для углепластиков марок ВКУ-45/УМТ-3К.РТН и ВКУ-45/3692, а также для аналога фирмы Cytec вследствие одинакового саржевого переплетения, за исключением углепластика на основе ткани УТ-900-3, для которого падение данного показателя в направлении $[90^\circ]$ составляет ~8% по причине полотняного типа переплетения.

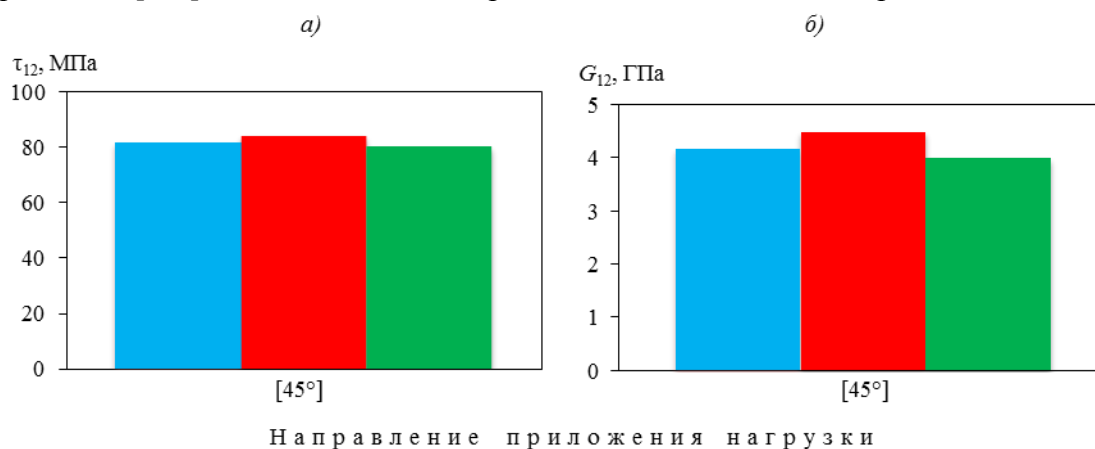


Рис. 4. Предел прочности и модуль упругости при сдвиге в плоскости листа углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН (■) по сравнению с отечественным (ВКУ-45/3692 (■)) и зарубежным (Сytec (■)) аналогами

На рис. 4 показаны результаты испытаний по определению предела прочности и модуля упругости при сдвиге в плоскости листа углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН в сравнении с зарубежным и отечественным (на основе импортных наполнителей) аналогами. Испытание проводили с приложением нагрузки в направлении $[\pm 45^\circ]$.

По значению предела прочности и модуля упругости при сдвиге в плоскости листа углепластики марок ВКУ-45/УМТ-3К.РТН и ВКУ-45/3692, а также аналог фирмы Cytec находятся на одном уровне. Данный показатель для аналога на основе ткани УТ-900-3 не определяли.

На рис. 5 показаны результаты определения предела прочности и модуля упругости при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН в сравнении с зарубежным и отечественными (на основе импортных наполнителей) аналогами. Испытание проводили с приложением нагрузки в направлении основы.

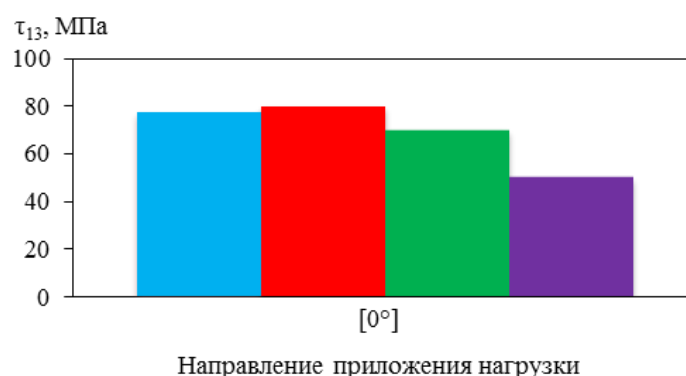


Рис. 5. Предел прочности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН (■) по сравнению с отечественными (ВКУ-45/3692 (■) и УТ-900-3 (■)) и зарубежным (Cytec (■)) аналогами

По показателю предела прочности при межслойном сдвиге углепластики марок ВКУ-45/УМТ-3К.РТН и ВКУ-45/3692 находятся на одном уровне, превышая данный показатель для аналога фирмы Cytec более чем на 8% и более чем на 30% – для углепластика на основе ткани УТ-900-3. Такое значительное отличие по этому показателю отечественного аналога на основе ткани УТ-900-3 обусловлено, прежде всего, устаревшим типом растворного связующего, характеризующегося образованием матрицы с высокой пористостью и низкой прочностью, что имеет определяющее значение при обеспечении прочной связи между слоями углеродной ткани в отвержденном пластике.

Обсуждение и заключения

При проведении данной работы разработан новый высокотехнологичный полуфабрикат (препрег) углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН на основе эпоксидного связующего ВСЭ-34 расплавного типа с энергоэффективным режимом отверждения, который разработан во ФГУП «ВИАМ», и армирующего наполнителя в виде равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-5 на основе нитей УМТ40-3К. Показано, что углеродная ткань ВТкУ-5 является аналогом импортной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692).

Разработанный материал изготавливается на опытных производственных мощностях ФГУП «ВИАМ» и предназначен для применения в конструкциях механизации крыла и оперения гражданских самолетов взамен импортных материалов фирмы Cytec и отечественных материалов на основе импортных наполнителей.

На основании проведенных испытаний можно сделать вывод, что разработанный углепластик ВКУ-45/УМТ-3К.РТН по своим упруго-прочностным характеристикам (предел прочности и модуль упругости при растяжении, предел прочности и

модуль упругости при сжатии, предел прочности при межслойном сдвиге, предел прочности и модуль упругости при сдвиге в плоскости листа) не уступает, а иногда и превышает показатели свойств зарубежного и отечественного аналогов.

Все проведенные исследования свидетельствуют о высоком качестве углеродного наполнителя, расплавно связующего и полученных на их основе образцов углепластика ВКУ-45/УМТ-3К.РТН.

Исследования углепластика проводили на опытных партиях материала и по основным механическим свойствам. Для дальнейшего внедрения в изделия авиационной техники требуется провести испытания в объеме общей и специальной квалификации по нескольким партиям, в том числе механических свойств при пониженных и повышенных температурах, длительные испытания, а также испытания после выдержки в химических средах и особых климатических условиях.

В настоящее время данный материал проходит технологическое опробование и специальную квалификацию на предприятиях отрасли, включающее автоматизированный раскрой препрега, ручную выкладку пакетов с подбором количества слоев и укладок, выбор оптимальных режимов формования для изготовления прототипов агрегатов, а также изготовления и исследования физико-механических свойств образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
5. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
6. Гусев Ю.А., Григорьев М.М., Тимошина Л.Н. Изготовление эталонных образцов из ПКМ с заданной пористостью методом вакуумной инфузии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-6-6.
7. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2008. №1. С. 17–24.
8. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
9. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.
10. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.
11. Гуляев И.Н. Препреги и углепластики на основе растворных связующих и тканей фирмы «Porcher Ind.» // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.04.2017).

-
- 12.Раскутин А.Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавленного типа и тканей PORCHER // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 01. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.04.2017).
 - 13.Душин М.И., Хрульков А.В., Раскутин А.Е. К вопросу удаления излишков связующего при автоклавном формовании изделий из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2017).
 - 14.Постнов В.И., Петухов В.И., Казаков И.А., Абрамов П.А., Постнов А.В., Сенаторова О.Г., Железина Г.Ф. Изготовление из МПКМ конструктивных элементов планера самолета и особенности их формообразования // Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 10–19.
 - 15.Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.